CONSORTIUMS PHOTOVOLTAÏQUES METTANT EN JEU LE CANADA ET L'EUROPE

UNE PERSPECTIVE BELGE INTÉRESSANTE

par

J. H. SIMPSON
Janvier 1982

Préparé pour le
Bureau de la conservation et des énergies renouvelables
Énergie, Mines et Ressources Canada
Ottawa, Canada
sous
Commande n° 1495846
Référence n° 23380-1-6734

Responsable de projet: le directeur général adjoint du
Bureau de la conservation et des énergies renouvelables
Énergie, Mines and Ressources

Agent du projet: G. Winstanley

COSIM SOLAR RESEARCH LTD.
2184 Braeside Avenue
OTTAWA, CANADA K1H 7J5

TABLE DES MATIÈRES

		PAGE
RÉSUMÉ		
1.	INTRODUCTION	1
2.	DESCRIPTION DE LA CELLULE SOLAIRE VAN OVERSTRAETEN	1
3.	SITUATION INDUSTRIELLE ACTUELLE DU PROCÉDÉ BELGE	3
4.	ATTITUDE DES INVESTISSEURS BELGES À L'ÉGARD D'UN CONSORTIUM AVEC LE CANADA	4
5.	AVANTAGES POSSIBLES POUR LE GROUPE BELGE D'UNE COOPERATION AVEC DES INVESTISSEURS CANADIENS	4
	5.1 Accessibilité aux marchés canadiens	4
	5.2 Accessibilité aux marchés du nouveau monde	4
	5.3 Les connaissances canadiennes en matière de circuits électroniques de contrôle etc.	5
6.	MECANISMES POUR LA COOPERATION	5
	6.1 Investissement en commun belgo-canadien dans une opération canadienne pour la fabrication des cellules	5
	6.2 Un investissement exclusivement canadien ou en commun dans une chaîne de production canadienne	6
	6.3 L'investissement dans une compagnie d'électronique canadienne	6
7.	RÉSUMÉ: ÉVALUATION ET RECOMMANDATIONS	7
8.	ADRESSES DES COMPAGNIES CANADIENNES FABRICANT LES CELLULES SOLAIRES PV	9
9.	ANNEXE: ADVANCES IN SILICON SOLAR CELL PROCESSING par R.J. van Overstraeten	9

RÉSUMÉ

Le présent rapport décrit sommairement une recherche de développement prometteuse belge qui pourrait aboutir à une réduction considérable du coût de fabrication des cellues solaires au silicium. Le groupe universitaire belge responsable du développement et le groupe industriel qui doit fabriquer le dispositif s'intéressent à un arrangement coopératif avec un groupe industriel canadien. Le présent rapport examine aussi les avantages pour les groupes belges d'une coopération avec des investisseurs canadiens. On mentionne les mécanismes possibles d'une coopération qui pourrait utiliser les connaissances canadiennes en matière de fabrication de cellules solaires et de circuits électroniques pour le conditionnement de la puissance. Enfin on donne les noms des personnes, en Belgique, pour des discussions détaillées.

1. INTRODUCTION

Au cours d'une visite faite à la Commission des communautés européennes à Bruxelles en octobre 1981 pour obtenir des renseignements sur les développements en Europe en matière de dispositifs et systèmes photovoltaïques (PV) l'auteur a profité pour rendre visite au professeur R. van Overstraeten à l'Université catholique de Leuven qui se trouve à quelque 25 km de Bruxelles. Le professeur van Overstraeten est très connu dans la communauté photovoltaïque en Europe pour l'impulsion qu'il apporte à son département et pour les connaissances sur la recherche, le développement et la production industrielle des dispositifs et systèmes PV en Europe.

Au cours de nos discussions, nous avons mentionné la possibilité de consortiums entre le Canada et les pays européens. M. van Overstraeten a décrit un développement d'un dispositif PV belge qui a commencé dans les laboratoires de son département et qui est actuellement en voie d'être transféré dans l'industrie. Il a mentionné que Belgosolar, la compagnie belge concernée, serait probablement désireuse de former un consortium avec un groupe canadien.

L'auteur estime que le procédé belge pour fabriquer les cellules solaires photovoltaïques est assez prometteur pour qu'un groupe d'investisseurs canadiens intéressés par le domaine photovoltaïque devrait l'étudier en vue d'une production éventuelle au Canada. On donne dans la section qui suit une description du dispositif et ses avantages. Dans les autres sections, on envisage les mécanismes qui pourraient servir de base pour un arrangement coopératif et on présente les recommandations pour la marche à suivre.

2. DESCRIPTION DE LA CELLULE SOLAIRE VAN OVERSTRAETEN

La cellule solaire mise au point au département d'électronique (ESAT) de l'Université catholique de Leuven, Belgique, est faite en silicium monocristallin ou polycristallin - comme la plupart des cellules qu'on trouve actuellement dans le commerce. La principale caractéristique du procédé van Overstraeten est que

toutes les matières utilisées pour la production de sa cellule solaire sont appliquées par sérigraphie. Cette méthode comprend l'application du dopant de la surface frontale pour former une jonction n-p et de la couche d'aluminium de la surface arrière pour former un champ de surface arrière ainsi que des électrodes avant et arrière et un revêtement anti-réflexion. On étudie les avantages de la sérigraphie relatifs à d'autres méthodes pour produire des cellules solaires dans l'article intitulé "Progrés dans le traitement de cellules solaires au silicium" qui a été présenté par le professeur van Overstraeten à la troisième conférence de la Communauté européenne sur l'énergie solaire photovoltaïque à Cannes, France, du 27 au 31 octobre 1980. Une copie de cet article est présentée en annexe du présent rapport. Les sections traitant de la sérigraphie sont marquées par des lignes dans la marge.

La sérigraphie est une technique bien connue dans la fabrication d'un grand nombre de dispositifs et de circuits électroniques et est déjà utilisée dans le commerce dans l'application des électrodes métalliques collectrices de courant dans les cellules solaires. ARCO Solar aux États-Unis (filiale de l'Atlantic Richfield Oil Co.) et Photowatt International S.A., France, utilisent ce type d'impression. Un aspect nouveau dans le cas présent est l'utilisation de la sérigraphie pour l'application d'une pâte contenant le dopant afin de créer une couche de type n. Une autre technique nouvelle peut être la production d'un champ de surface arrière par sérigraphie et diffusion ultérieure d'une couche d'aluminium. Cette dernière est une des caractéristiques qui permet d'obtenir un rendement moyen relativement élevé (12%) pour ces cellules. Comme on le fait remarquer dans l'annexe, un autre facteur important est la compatibilité des différentes étapes de la fabrication des cellules qui minimise le nombre des compromis devant être faits lors de la fabrication.

Enfin, la dernière caractéristique d'un procédé n'utilisant que la sérigraphie et le rendant particulièrement attrayant est la possibilité de l'adapter à une production en chaîne. En utilisant un four horizontal contenant plusieurs sections pouvant fonctionner à différentes températures et avec différentes atmosphères gazeuses, puis en incorporant des stations de sérigraphie entre les sections du four, il est possible d'obtenir une production continue automatisée au lieu de la production par

lots caractéristique de la fabrication de la plupart des cellules solaires. La baisse du coût qui en résulte pourrait permettre d'atteindre l'objectif de coût de un dollar U.S./Wc.[1]. (Les coûts actuels minimaux dans le commerce varient de 12 à 14 dollars). Il est vrai que la nécessité d'automatiser l'assemblage des cellules pour former des modules existe toujours mais ce problème est commun à tous les fabricants.

3. SITUATION INDUSTRIELLE ACTUELLE DU PROCÉDÉ BELGE

La recherche et le développement sur le procédé complet de la sérigraphie se fait depuis plusieurs années à Leuven et il existe une chaîne pilote capable de produire en un an, un totale de 5 kWc de cellules de 7,5 cm de diamètre dans le département de l'université. Cette chaîne ne constitue pas une chaîne de production continue; les opérations de sérigraphie se font à l'extérieur d'un four qu'on utilise pour différents traitements thermiques. Le four contient six sections environ ayant différentes températures et atmosphères.

Deux compagnies belges collaborent à la production de cellules et de modules PV utilisant ce procédé. Ces deux compagnies sont FABRICABLE, un important fabricant de câbles et d'autres matériels électriques, qui est chargé de la production et Industrie Développement Energie (IDE) qui fera l'encapsulation des cellules en panneaux ou modules. Le consortium des deux compagnies est connu actuellement sous le nom de BELGOSOLAR. La production de cellules à Fabricable devait commencer en novembre 1981.

1. Le nombre de watts-crête (Wc) obtenu à partir d'un module PV ou d'un groupe de tels modules est sa puissance produite lorsque l'ensoleillement qui l'atteint est de 1000 watts (1,0 kW) par mètre carré (m^2) à une température ambiante spécifié (par example 25°C).

4. ATTITUDE DES INVESTISSEURS BELGES À L'ÉGARD D'UN CONSORTIUM AVEC LE CANADA

Le professeur van Overstraeten semblait assez enthousiaste à l'idée d'un consortium. Il fit remarquer cependant que la production n'était qu'à ses débuts et qu'il serait prématuré d'envisager un transfert de technologie. Néamoins, il suggéra qu'il serait préférable d'entrer en contact avec M.M.Goddaer, du département photovoltaïque de Fabricable. C'est ce que je fis et M. Goddaer était très enthousiaste quant à la possibilité d'une collaboration. Il confirma les paroles du professeur van Overstraeten, selon qui la production venait à peine de démarrer et suggéra que les groupes canadiens intéressés devraient entrer en contact avec lui. On trouvera l'adresse de M. Goddaer dans la section 7 du présent rapport.

5. AVANTAGES POSSIBLES POUR LE GROUPE BELGE D'UNE COOPÉRATION AVEC DES INVESTISSEURS CANADIENS

Avant d'examiner les mécanismes par lesquels un arrangement coopératif pourrait être mis en oeuvre, il est important de considérer les facteurs pouvant rendre un tel arrangement attrayant pour les investisseurs belges. Parmi ces facteurs on peut citer:

5.1 Accessibilité aux marchés canadiens. Le coût relativement bas du dispositif belge pourrait ouvrir un grand nombre d'applications au Canada pour les sites isolés et les sites de loisirs.

5.2 Accessibilité aux marchés du nouveau monde. A court terme cela inclurait principalement les Antilles, mais plus tard les marchés de l'Amérique centrale et de l'Amérique du sud peuvent être exploitables. Si la promesse actuelle d'un prix bas et d'une bonne fiabilité est tenue, l'accès au marché des États-Unis ne serait pas à négliger. La concurrence des géants tels que Solarex, ARCO, etc., serait considérable mais, si le premier avantage du procédé belge pouvait être maintenu, l'accès à une grande partie du marché des États-Unis pourrait être acquis grâce à une opération de fabrication au Canada.

5.3 Les connaissances canadiennes en matière de circuits électroniques de contrôle, régulateurs et micro-ordinateurs pourraient rendre possible une grand participation dans l'opération des systèmes PV qui pourrait être complementaire des développements des cellules solaires belges. Certaines petites compagnies canadiennes ont d'excellentes possibilités dans la transformation électrique (cc en cc et cc en ca) et, peut-être avec l'aide de certains groupes universitaires canadiens, pourraient adapter leurs connaissances à l'étude et la construction des circuits de conditionnement de la puissance nécessaires aux systèmes d'énergie PV.

6. MECANISMES POUR LA COOPÉRATION

Avant de décrire les arrangements possibles d'une coopération entre Belgosolar et un groupe canadien, il serait peut-être préférable de souligner qu'un investissement direct canadien dans l'opération Belgosolar en Belgique n'est probablement pas une perspective immédiatement intéressante du point de vue belge. Fabricable et IDE semblent être assez grands pour financer leur propre opération. Une possibilité plus intéressante pourrait être un investissement en commun belgo-canadien dans une opération canadienne avec des investissements partagés dans les deux pays à mesure que l'opération se développerait. Il n'est pas possible actuellement de connaître avec certitude les préférences belges et des négociations d'envergure seront certainement nécessaires pour mettre au point un arrangement coopératif convenable. Comme base d'argumentation pour une position canadienne on pourrait envisager les possibilités suivantes:

6.1 Investissement en commun belgo-canadien dans une opération canadienne pour la fabrication des cellules. Cela pourrait mettre en jeu un fabricant canadien, ce qui apporterait des connaissances canadiennes aux techniques de fabrication des cellules. (On trouvera à la fin du présent rapport les noms et les adresses des trois fabricants canadiens). Il faudrait investir pour créer une chaîne de production du type Fabricable mais, étant donné que les procédés de sérigraphie et de traitement thermique peuvent s'adapter facilement à une production continue relativement petite, un tel investissement n'a probablement pas besoin d'être très grand au départ.

Si on décidait de mettre en oeuvre une telle opération, cela vaudrait probablement la peine d'attendre que la chaîne de production de Fabricable ait fonctionné pendant environ un an. Une opération de ce type peut souvent donner naissance à des difficultés imprévues et une tentative de lancement prématuré d'une opération canadienne pourrait conduire à une répétition des difficultés belges.

6.2 Un investissement exclusivement canadien ou en commun dans une chaîne de production canadienne pour fabriquer des connexions électriques et pour encapsuler des groupes de cellules pour former des modules. Pour fabriquer un module normal capable de charger une batterie de 12 volts il faut connecter de 32 à 36 cellules en série. La mise en place des cellules et le brasage des connexions devraient se faire automatiquement si possible. Il faudrait pour cela un investissement important dans un matériel spécialisé. De la même façon, l'encapsulation des cellules utilisant une isolation convenable pour les isoler les unes des autres et pour les isoler du chassis du module peut être un procédé coûteux à automatiser. Cependant, si on doit tirer profit des bas prix des cellules, il faudra maintenir un faible coût du montage et de l'encapsulation. C'est une perspective dans laquelle une opération canadienne pourrait se dérouler parallèlement avec celle de l'IDE en Belgique. (Initialement, les cellules pourraient venir de Belgique pour encapsulation au Canada). Des relations étroites entre ces deux groupes pourraient aboutir à des méthodes perfectionnées de connexion et d'encapsulation et à une baisse des coûts. Là aussi, il vaudrait peut-être la peine de tirer profit du savoir-faire du Canada en investissant dans une des fabriques de cellules solaires existantes.

6.3 L'investissement dans une compagnie d'électronique canadienne ayant des connaissances dans la conception des circuits de contrôle, de régulation et d'alimentation. On pourrait étudier les problèmes apparentés aux aspects de contrôle et de conditionnement de la puissance et développer des modèles de composants et d'ensembles standard destinés aux applications des systèmes PV. On voit là un

domaine où un groupe canadien pourrait apporter une contribution importante, en un temps relativement court, à un effort en commun belgo-canadien. Par la suite un tel groupe pourrait se diversifier dans la fabrication d'appareils électriques, de lampes, de moteurs, etc., ayant un bon rendement et une faible consommation, spécialement adaptés pour utiliser l'alimentation PV.

7. RÉSUMÉ: ÉVALUATION ET RECOMMANDATIONS

On peut résumer les résultats de l'analyse ci-dessus comme suit:

7.1 La mise au point d'une cellule solaire PV (van Overstraeten) belge présente des possibilités excellentes pour abaisser le coût des cellules solaires PV à un point tel que beaucoup plus d'applications que celles qui existent actuellement seraient économiquement viables.

7.2 Le groupe Belgosolar est désireux d'entrer dans un consortium avec un groupe canadien.

7.3 Les marchés du Canada et des Antilles devraient représenter des marchés intéressants pour les Belges. Dans un avenir plus lointain, et en supposant que le procédé belge puisse maintenir son avantage en matière de coût, il serait possible de pénétrer le marché des États-Unis et des autres pays américains.

7.4 Le procédé de fabrication des cellules vient d'être transféré, en Belgique, à la production industrielle. Si la fabrication au Canada était retardée d'un an environ le groupe canadien pourrait tirer profit de l'expérience belge pour organiser sa production.

7.5 Afin de tirer profit au maximum de la baisse des coûts des cellules, il y aurait lieu de faire un gros effort parallèle pour réduire les coûts de la construction des modules. Cette opération nécessiterait un investisse-

ment important mais donnerait au Canada une forte position dans un arrangement coopératif. Le savoir-faire dans les opérations de fabrication de dispositifs photovoltaïques au Canada pourrait faire de l'une d'elles un noyau utile pour démarrer une production de cellules et de modules.

7.6 Les capacités d'un certain nombre de compagnies canadiennes de circuits électroniques sont telles qu'elles pourraient apporter une contribution canadienne importante au domaine du conditionnement de la puissance et du contrôle.

En raison de tous ces facteurs, l'auteur estime qu'un consortium belgo-canadien, pour exploiter la cellule solaire PV van Overstraeten et les développements connexes dans le domaine de la construction des modules et du conditionnement de la puissance, est très prometteur. Nous recommandons que des groupes d'investisseurs canadiens intéressés communiquent avec M. M. Goddaer dont voici l'adresse:

M. M. Goddaer
Fabricable
Heideveld No 1
1511 Huizingen
Belgique

Pour obtenir de plus amples renseignements d'ordre technique sur le développement et la position relative par rapport aux autres dispositifs photovoltaïques, on pourrait rentrer en rapport avec le professeur van Overstraeten dont voici l'adresse:

Professeur R. J. van Overstraeten
E.S.A.T.
Katholieke Universiteit Leuven
Kardinaal Mercierlaan 94
B - 3030 Heverlee
Belgique

Les services de la compagnie de l'auteur sont à votre disposition pour vous aider à établir les premiers contacts ou pour faire une évaluation détaillée des aspects techniques d'un arrangement proposé. (Cosim Solar Research Limited)

8. ADRESSES DES COMPAGNIES CANADIENNES FABRICANT LES CELLULES SOLAIRES PV

Voici les adresses des trois fabricants canadiens des cellules solaires:

TPK Solar Systems Inc.
149 Bentley Ave., B - 4A
Nepean, Ontario K2E 6T7
(613) 225-4403
Président: M. R.E. Thomas

Solar Cells Limited
3327D Mainway, P.O. Box 1025
Burlington, Ontario L7P 3S9
(416) 335-4713
Président: M.J. Shewchun

Silonex Inc.
2150 Ward Street
Montréal, Québec H4M 1T7
(514) 744-5507
Président: M. D.A. Anderson

9. ANNEXE:

ADVANCES IN SILICON SOLAR CELL PROCESSING
par R.J. van Overstraeten

ADVANCES IN SILICON SOLAR CELL PROCESSING

R.J. VAN OVERSTRAETEN

E.S.A.T.
Katholieke Universiteit Leuven
Kardinaal Mercierlaan 94
B - 3030 Heverlee
Belgium

SUMMARY

The reduction in cell fabrication cost is a major goal of research and development. The solar cells not only have to be cheap, but they also have to be reliable and highly efficient.
The design paramters for obtaining high efficient cells,as derived from the physics underlying the performance of the silicon solar cells are not always compatible with low cost production and high reliability.
The different processing steps are : surface preparation, front junction formation and eventually low-high junction formation for a back surface field, formation of front and back ohmic contacts, elimination of edge effects and application of an anti-reflective coating.
The specific objectives and the criteria for every pricessing steps are given, together with a survey of the most viable processes.
It is concluded that several processes are compatible with a cost objective of 1 $/peak watt.

1. INTRODUCTION

It is generally accepted that crystalline silicon solar cells are the cells that will be produced predominantly by the photovoltaic industry for the next 10 years. In this timeframe the price will be reduced to approximately 1 dollar per peak Watt. At this price level, there will be an enormous market mainly in developing countries and for residential and remote applications also in industrialized countries.

The purpose of this paper is to discuss the different technologies which are used or are under study in the solar cell production, with emphasis on the technologies compatible with the intermediate term cell fabrication cost goal of 2. - .3 $/W, in agreement with a panel cost of 1$/W.

First we will review the design parameters, based on the physics of the cell.Then we will discuss the different steps in the fabrication.

2. PHYSICS UNDERLYING THE OPERATION OF A SOLAR CELL

The choice of the thickness of the silicon wafer is very important because of the high cost of the silicon. Both theoretically and experimentally (Ref.1,2) it has been shown that a 100μm thick cell with a BSF (back-surface-field) yields an efficiency as high or even higher than the standard n+p cell on a 250μm wafer. Cutting methods for thin wafers and with low kerf losses are thus important and have to be further developped. Improved handling of thin wafers to avoid breaking is necessary.

A second consideration concerns the efficiency of the cells. The

efficiency has to be as high as possible, because several cost factors increase with the area. These costs include the land usage, the cell structure, the interconnections, the encapsulation, the support frame,and partially the transportation from the manufacturing site. A reduction of the solar cell processing cost thus may not result in a lower efficiency. To reach the intermediate cost goals an efficiency of 15% is required. It is useful to review briefly the factors determining the efficiency. The efficiency of a solar cell is given by

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}}$$

with I_{sc}, the short circuit current, V_{oc} the open circuit voltage, FF the fill factor and P_{in} the input power. All three factors I_{sc},V_{oc} and FF have to be maximized. They are however not independent of each other.

A large I_{sc} is the result of the following factors :

1. a low reflection (through the use of an anti-reflective coating (A.R.) and eventually texturizing the surface) and a small metal coverage(good grid design).
2. a large diffusion length in both regions, such that in practice it often will be larger than the width of the region. The diffusion length of the minority carrier lifetime decreases with increasing doping level. Heavy doping has thus to be avoided. Some high temperature steps can decrease the lifetime. Special gettering steps can increase the lifetime.
3. a low surface recombination velocity s on both surfaces. On the back surface, a low effective surface recombination velocity can be obtained through the use of a back surface field(i.e. a low-high junction). The front surface recombination velocity can be reduced by using a good passivation between the gridlines. The A.R. coating therefore has to passivate also. A polysilicon layer can be used under the metal grid to reduce s also under the grid lines.

   The open circuit voltage is given by

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right)$$

   A high V_{oc} requires a high I_{sc} and a low dark current density I_o. The methods to increase I_{sc} are dicussed above. A low dark current density is the result of :

   a. large lifetimes throughout the cell. The methods are dicussed above.
   b. high doping levels to decrease the generation of minority carriers. The doping level can however not be taken too high; otherwise the lifetime decreases.
   c. surface leakage currents have to be avoided
   d. a back surface field

A high fill factor requires a small second diode current, a low series resistance and a large shunt resistance. To obtain a low series resistance the resistance of the metal grid and the contact resistance have to be small. The grid pattern thus has to be a compromise for low resistance and for low reflection. The doping level of the front layer has to be sufficiently high and the junction has to be rather deep.

3. PROCESSING STEPS

The manufacturing sequence for cell fabrication can be divided in the following steps : surface preparation, junction formations, antireflective

coating and metallization.

3.1. Surface preparation

The objective of this step is to get clean, damage free wafers from as cut monocrystalline or polycrystalline wafers by etching. It has been shown that the fracture probability is decreased considerably by etching out the surface damage(Ref.3) This increases the production yield and improves the cell durability. The etching (10 to 20μm) is performed with acid or alkaline etchants. The acid etchant (e.g. 4% HNO_3, 20% CH_3COOH, 16% HF) gives good results on both $\langle 100 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ surfaces, but is expensive. The alkaline etchant (e.g. 30% hot Na OH) gives very good results on $\langle 100 \rangle$ material, is orientation dependent, is about 10 times cheaper and does not cause ecological problems. Damage sites are attacked at a faster rate such that only thinner layers have to be removed. The orientation dependence has the advantage of reducing the reflection by texturizing the surface. A texturized surface can cause problems for some later processing steps only when a good surface flatness is required as for example for the spin-on of the diffusion source.
Iron and metallic contamination in general can be eliminated by using a diluted solution of HCl or of HNO_3.

3.2. Front junction formation

Very high doping levels resulting in bandgap narrowing and in a low lifetime in the front layer have to be avoided. The introduction of the impurities has to be carried out in such a way that the lifetime of minority carriers in the starting material does not decrease.

Several techniques can be used :

- diffusion out of a gaseous phase at 850-950°C is the most widely used method. The disadvantages are : it is a batch process, the diffusion occurs on both sides such that the back parasitic junction has to be removed and uniformity is a problem for very shallow junctions.
- diffusion out of a solid phase consists of a deposition of a dopant layer, followed by a drive-in of the dopant. The deposition can be done using Chemical Vapor Deposition, spin-on, spray-on or screen-printing. The advantage is that only a junction on the front side is made.

-C.V.D: uniform phosphorus and boron doped oxides are deposited at low temperatures on either side of the wafer. A drive-in step yields uniform profiles with well controlled surface concentration. One optimized drive in step yields simultaneously the front junction and the B.S.F. A disadvantage is the use of highly pure and relatively expensive gases.

-spin-on and especially spray-on of doped layers has the advantage of ease of automation and high throughput. The fill factor is relatively low, probably due to nonuniformities. The edges of the wafer are diffused : the edge parasitic junction can be removed by laser scribing followed by breaking, by chemical etching or by plasma etching. A stack of wafers can be plasma etched simultaneously.

-diffusion out of a screen printable doped paste is a recent technique with several advantages : easy to automate, the screen mask can limit the diffusion to the front surface and the equipment is cheap. This process can be combined with screen printed front and back metal contacts resulting in a total screen printing process. The total screen printing process already gives efficiencies above 12% (Ref.5)

-diffusion out of thin solid discs, composed of boron and phosphorus in solid form, mixed with silicon dioxide and organic binder material (Ref.6). The discs and the wafers form a continuous stack. It is a batch process with a high throughput. Front junction and BSF can be made simultaneously. Efficiencies of 12% were reported. An improved

boron nitride glass transfer process gives higher efficiencies(Ref.7).
- ion implantation which is known for the excellent control of the profile can also be used(Ref.8,9). This technique is reviewed explicitly in the next paper. The damage removal can be done using a thermal annealing, a laser beam or an electron beam. Excellent results are reported for the different annealing techniques, also on semicrystalline materials. The disadvantage is the high cost equipment. Ion implanters can however be simplified dramatically, reducing the cost of the equipment and making it eventually cost effective also for lower volume-production.
- laser induced diffusion is a recent technique. A vacuum deposited thin layer of antimony is driven in by an irradiation with a ruby laser pulse. The cost effectiveness is questionable (Ref.10).
- epitaxial growth on a wafer of upgraded metallurgical silicon gives good efficient cells (Ref.11). This technique is very interesting because the cost of the metallurgical grade silicon is almost negligible. The epitaxial growth process is however too expensive; the process has to be made cheaper and more efficient, probably by using low pressure epitaxy allowing stack piling.

All these methods potentially give high efficient cells. The choice will thus be determined by factors as : ease to automate, low cost capital equipment, production yield, throughput.

3.3 Back surface field

All the methods discussed for the front junction formation can in principle also be used for the back surface field. The number of high temperature steps has however to be limited to avoid minority carrier lifetime degradation. Therefore, the best choices are :
- diffusion out of a solid source with the same drive-in as for the front junction
- ion implantation and laser annealing. The present disadvantage is that a high volume production is required to be cost effective.
- the most attractive way on p-type silucon is the alloying of a solid Aluminum film. This film can be applied either by evaporation or by screen printing. Open circuit voltages of 610 mV are reported. Theoretical calculations show that the effective surface recombination velocity can be reduced to low values if the p^+ layer is sufficiently thick(Ref.12).

3.4. Metallization

The objectives are : a good ohmic contact, a low series resitance, a good adherence and a good solderability. There are several candidate methods :
- vacuum evaporation of Al/Ag or Ti/Pd/Ag : it is a well known method yielding high efficient cells. It however uses expensive materials, it is a batch process and has a poor material yield. It therefore is too expensive .
- plating of electroless nickel through a mask in photoresist or in the A.R. coating. Problems can occur by an oxide layer on the silicon, resulting in a limited adherence and a poor contact resistance. The problem can be avoided by using an intermediate layer of Palladium which forms a palladium silicide after heat treatment(Ref.13). The resistivity has to be lowered by solder coating. The disadvantages are : the high Palladium costs and the need for solder coating. An improved method is the use of a Ni/Cu system, without Palladium. The nickel is a good diffusion barrier for the copper. Disadvantages are still the use of a photomasking step to define the grid pattern, eventually the long term stability and the possible ecological problems caused by the plating bath.

- screenprinting. This technique is well known in the electronic industry and can easily be automated. The production yield is very high, the equipment is cheap and easy to maintain and the material yield is very high. (Ref.14).
The front metallization is usually done with a Ag paste eventually fired through the A.R. coating. A good adherence and a low contact resistance are obtained. The back metallization is done with Al paste and a second screening with a solderable AgPd paste. A one step process is also possible by using a mixture of Ag and Al. An advantage of this process certainly is that it can be combined with the screenprinted diffusion and with the screen printed BSF, as discussed above. The Ag paste is expensive and should , in the future, be replaced by a cheaper paste. Recently good results were published on the use of Cu and Ni pastes for the back contact. Copper pastes doped with Al Ge and Al Si eutectics give good results. (Ref. 15).
- a process similar to the screenprinting process is the use of Midilm (Ref.16) A line resolution of 50 µm is obtained. The wafer is coated with a photoresist which is exposed through a mask . A dry mixture of metal and frit material is applied and adheres to the non-exposed pattern. Firing in a continuous furnace results in fine metal lines.
The most promising technique certainly is screenprinting.

3.5. Anti reflective coating

The objective of this step is to reduce the reflection and to lower the surface recombination velocity.

A coating with a refractive index of 2 is required. Different oxides like SiO, TiO_x, Ta_2O_5,... can be used. The deposition can be done by sputtering, vacuum evaporation, spin on, spray on, or screen printing.

Sputtering and vacuum evaporation result in excellent layers, but are expensive. Spin-on and spray-on are cheap continuous processes. The thickness of the layer is however difficult to reproduce with a spin-on technique. Spin-on gives only excellent layers on flat wafers.

Due to the difference in cost, spray-on or screen printing is preferred above a sputtering or vacuum evaporation.

4. CONCLUSION

The cost of most of the techniques discussed above has been calculated for a high volume process. There are several combinations compatible with a cost of 1 dollar per peak Watt.

It may be concluded that the number of different ways in which the final cost goals can be reached is large. Industry is using different technologies and it looks like also in the future there will not be one unique process. Differences will result also from the use of different substrate materials (CZ monocrystalline wafers, casted semicrystalline and HEM material, ribbons,...) and from how easy some processing steps can be adapted for the use on these wafers.

Not all the different processing steps are compatible in one manufacturing sequence. It usually is not possible to optimize one step without influencing the other processing steps. A good example of compatible processing steps is the total screen printing process, as mentioned earlier.

Research on different processing steps is still required to improve the efficiency in high volume processing.

REFERENCES

1. M.Wolf : " Updating the limit efficiency of silicon solar cells"IEEE Trans. El.Devices, Vol.ED-27, nr 4,april 1980, 751.
2. R.A. Pryor : " Empirical study of the interaction of Si substrate thickness, device design and solar cell processing ", Proceedings 14th Photovoltaic Specialist Conference, 1980, p.815
3. C.P. Chen, E.L. Royal and H.Klink : " Effect of production processes on the fracture strength of silicon solar cells, Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p.929.
4. B.D. Gallagher, D.B.Bickler, L.E. Sanchez : " A candidate low-cost processing sequence for terrestrial silicon solar cell panels", Proceedings 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 241
5. L. Frisson et al, " Silicon solar cells with screen printed diffusion and metallization ", Proceedings 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, p. 941
6. R.E. Thomas, A.A. Amstrong : " Solid Source diffusion process for silicon solar cells", Proceedings 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1980, p 811.
7. N.H. Ditrick, M.S. Bae : " An improved Boron Nitride Glass Transfer" Process, Solid State Technology, july 1980, p 69.
8. A.R. Kirkpatrick, J.A. Meunurci, A.C. Greenwald : " Low cost ion implantation and annealing technology for solar cells", Proceedings 14th IEEE Photovotlaic Specialists Conference, p 820.
9. R.F. Wood, R.T. Young: " Solar cells from ion implanted, laser annealed cast polycrystalline silicon ", Proceedings 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1980, p.214
10. R. Stuck et al : " Silicon solar cells realized by laser induced diffusion of deposited antimony ", Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1980, p.829.
11. P.H. Robinson: " Epitaxial solar cells on metallurgical grade silicon substrates ", Proceedings 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, p. 54
12. J. del Alamo, J. Eguren, A. Luque : " Operating limits of Al alloyed high low junctions for BSF solar cells", to be published in Solid State Electronics.
13. M.G. Coleman, R.A. Pryor, T.G. Sparks : " The Pd_2Si-(Pd)-Ni solder plated metallization system for silicon solar cells", 13th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1978, p 597
14. L. Frisson et al : " Screen printed contacts on silicon solar cells with low series resistance ", Proceedings 13th Photovoltaic Specialist Conference, 1978, p 530.
15. B. Ross : " The use of eutectic alloys in screened contacts ", 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1980, p 1406.
16. N. Mandesich et al : " A low cost Photovoltaic cell process based on thick film techniques", 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference 1980, p. 943.